

УДК 621.18

Л. А. Боднар, к. т. н., доц.; Д. В. Степанов, к. т. н., доц.; Р. В. Сливко

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ РАБОТЫ ТЕПЛОГЕНЕРАТОРА МОЩНОСТЬЮ 1500 КВТ НА СОЛОМЕ

Показано, что применение теплогенераторов на альтернативных видах топлива, в том числе соломе, является одной из наиболее актуальных задач. Проведены экспериментальные исследования показателей работы теплогенератора на соломе мощностью 1500 кВт. Проанализированы результаты исследований. Проведено сравнение расчетных и экспериментальных данных по температуре дымовых газов на выходе из топки. Проанализирована возможность применения нормативного метода теплового расчета котлоагрегатов при проектировании теплогенераторов на альтернативных видах топлива.

Ключевые слова: солома, альтернативные виды топлива, котел, коэффициент полезного действия, теплообмен в топке.

Введение

Во многих европейских государствах важное место в их топливно-энергетическом балансе занимает солома. Сжигание соломы является рациональным способом получения тепловой энергии. По статистическим данным [1], Украина ежегодно потребляет около 180 ... 210 млн. т. условного топлива и относится к энергозависимым странам. Цены на импортируемые традиционные энергоносители постоянно растут. Одной из составляющих энергетической стратегии Украины [2] к 2035 году является увеличение использования биомассы для производства энергии до 13,1 млн. т. н. э. В Украине существует оборудование и демонстрационные проекты по эффективному использованию соломы для теплоснабжения. Но, как указано в работе [3], отечественных теплогенераторов широкого типоразмерного ряда для сжигания соломы на рынке отопительного оборудования недостаточно. Для широкого внедрения технологий сжигания соломы необходимы научно-обоснованные методы проектирования теплогенераторов. Анализ отечественных научных источников показал, что экспериментальные исследования энергетических и экологических показателей котлов для сжигания соломы практически не проводят. В литературе [4] приводят рекомендации по теплотехническим испытаниям водогрейных котлов с периодическим сжиганием целых тюков соломы. Обзор научных источников показал также, что в открытом доступе рекомендаций по проектированию теплогенераторов на соломе нет.

Целью этой работы является анализ и обобщение результатов экспериментальных исследований показателей работы теплогенератора для сжигания соломы мощностью 1500 кВт.

Основная часть

Котел для сжигания тюков соломы мощностью 1500 кВт расположен на территории зернокомплекса на одном из предприятий Винницкой области. Теплогенератор предназначен для нагрева воздуха, поступающего в сушилку зернокомплексов. На рис. 1 приведен общий вид теплогенератора. Котел имеет две топки и общий теплообменник, расположенный над топкой. В топку одновременно загружают два тюка соломы. Сначала зажигают топливо в одной топке; когда температура воздуха на выходе из теплообменника снижается, зажигают солому во второй топке. Охлаждение топки водяное. Нагретая в топке вода поступает в оребренный воздухонагреватель, где нагревает воздух, поступающий в теплообменник котла. Охлажденная в теплообменнике вода поступает в топку для охлаждения ее поверхности. Масса загружаемых в топку тюков соломы $300 \text{ кг} \pm 20 \text{ кг}$. Котел оборудован автоматикой и датчиками.



Рис. 1. Общий вид теплогенератора для сжигания соломы

Измеряют автоматически и выводят на дисплей пульта управления следующие параметры: температуру воздуха на выходе из теплообменника котла; температуру воды на выходе из рубашки охлаждения топки; температуру газов на входе в теплообменник. Последний параметр измеряют термопарами, расположенными в исходном окне топки. Температуру газов на выходе из котла во время эксперимента измеряли с помощью ртутного термометра с ценой деления $5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Для определения расхода воздуха на горение в коробе, по которому поступал воздух, с помощью термоанемометра измерена скорость и температура. Измерено также поперечное сечение короба. Теплообменник котла выполнен кожухотрубным с площадью поверхности нагрева 136 м^2 . В топке котла есть два ряда отверстий для подачи воздуха на горение. Площадь поверхности стен топки $23,3\text{ м}^2$. На рис. 2 показан процесс загрузки тюка соломы в теплогенератор, а также процесс горения тюка соломы.



Рис. 2. Процесс загрузки тюка соломы в теплогенератор и горение

Во время проведения эксперимента фиксировали следующие показатели: температуру воздуха на выходе из теплообменника котла; температуру воды на входе и выходе из топки; температуру дымовых газов на выходе из котла; температуру дымовых газов на выходе из топки. Расход воздуха на котел составил $36000 \text{ м}^3/\text{ч}$.

Анализ соломы пшеницы не проводили. Для расчетов взяты среднестатистические показатели [5] $W^p = 14,49\%$, $C^p = 40\%$, $N^p = 0,35\%$, $H^p = 5\%$, $S^p = 0,16\%$, $O^p = 36\%$, $A^p = 4\%$, $Q_{н.р} = 14,48 \text{ МДж/кг}$. Коэффициент полезного действия котла определяли по обратному тепловому балансу. При этом потери теплоты с уходящими газами определяли расчетным путем на основе измеренного значения температуры отходящих газов. Потери теплоты от химической и механической неполноты сгорания принимали на основе анализа экспериментальных данных авторов [6]: $q_3 = 1\%$, $q_4 = 4\%$, $q_5 = 1,5\%$. Коэффициент полезного действия котла менялся на протяжении эксперимента в пределах 71 – 73%. Коэффициент избытка воздуха 1,8 – 2,8. Аналогичные данные были получены в работе [7].

Для теплового расчета теплогенератора создана математическая модель, реализованная в Microsoft Excel. При построении математической модели использованы рекомендации, разработанные авторами в [8].

Теплогенератор работает в нестационарном режиме. Для обеспечения необходимого уровня температуры воздуха, поступающего на сушку, процесс горения происходит непрерывно в обеих топках. При этом в одной из топок догорает остаток соломы, в другой – горит очередная загруженная порция топлива. Благодаря такому конструктивному исполнению топки основные показатели котла остаются на стабильном температурном уровне. На рис. 3 приведена смена температур теплоносителей в течение эксперимента. Как видно из рисунка, температура воздуха менялась в пределах 118 ... 131 °С. Температура воды на выходе из топки 87 ... 90 °С. В случае достижения температуры воды на выходе из топки более 90 °С вентилятор подачи воздуха на горение выключается с целью предотвращения закипания воды в котле.

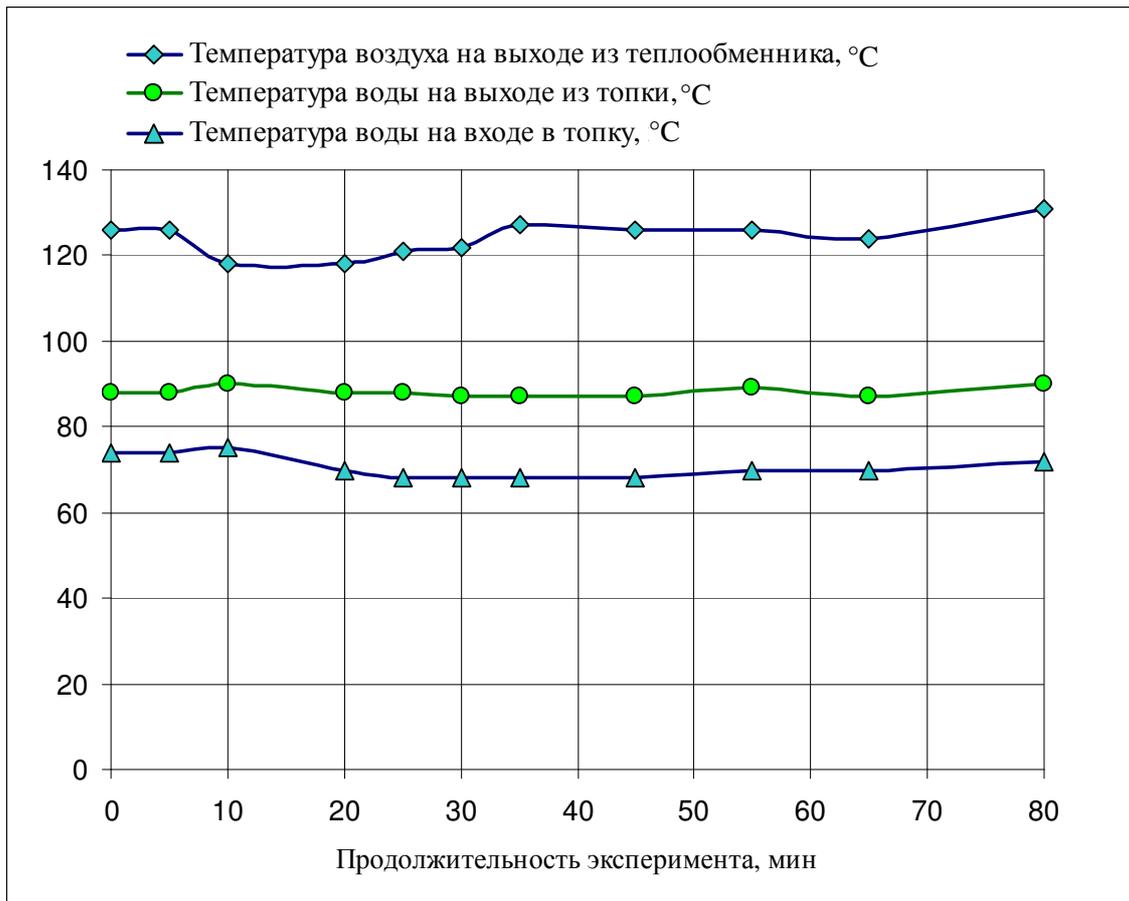


Рис. 3. Изменение температур воздуха и воды на протяжении эксперимента

С помощью термопары измерена температура дымовых газов на выходе из топки. Проведено сравнение полученных данных с расчетными. Для расчета теплообмена в топке использованы рекомендации нормативного метода (НС) теплового расчета котлоагрегатов [9]. Методика расчета суммарного теплообмена в топке базируется на применении теории подобия к топочному процессу. В методике учтены самопоглощение теплового излучения в пристенных слоях топочной среды в критерии Бугера Bu , который считают основной радиационной характеристикой продуктов сгорания. Нормативный метод был разработан на основе многочисленных экспериментальных данных для теплового расчета энергетических котлов на природном газе, угле, мазуте, торфе и сланцах. При расчете теплогенераторов для сжигания целых тюков соломы возникает задача адаптации методики НМ расчета теплообмена в топке к особенностям горения топлива в таких котлах.

Температуру газов на выходе из топки определяют по формуле (1)

$$\vartheta_m'' = \frac{T_a}{1 + M \cdot B\tilde{u}^{0,3} \left[\frac{\sigma_0 \cdot \psi_{cp} \cdot F_{cm} \cdot T_a^3}{\phi \cdot B_p \cdot (Vc)_{cp}} \right]^{0,6}} - 273, \quad (1)$$

где T_a – адиабатная температура горения топлива, которая соответствует в $I-\vartheta$ таблице полезному тепловосприятию топки Q_m ; M – параметр, учитывающий влияние на интенсивность теплообмена уровня расположения горелок, меры забаластованности топочных газов и других факторов; $B\tilde{u}$ – эффективное значение критерия Бугера по (2)

$$B\tilde{u} = 1,6 \cdot \ln \left(\frac{1,4 \cdot Bu^2 + Bu + 2}{1,4 \cdot Bu^2 - Bu + 2} \right), \quad (2)$$

$(Vc)_{cp}$ – средняя суммарная теплоемкость продуктов сгорания, кДж/(м³·К)

$$(Vc)_{cp} = \frac{Q_T - I''_{m.пр.}}{\vartheta_a - \vartheta_T''}, \quad (3)$$

где $\sigma_0 = 5,67 \cdot 10^{-11}$ кВт/(м²·К⁴) – коэффициент излучения абсолютно черного тела; $I''_{m.пр.}$ – энтальпия продуктов сгорания при температуре газов на выходе из топки ϑ_m'' и избытка воздуха на выходе из топки α_m ; ψ_{cp} – средний коэффициент тепловой эффективности экранов. Для определения коэффициента ψ_{cp} необходимо выбрать из таблицы 6.3 НМ [9] значение коэффициента ζ , учитывающего тепловое сопротивление загрязнения или закрытие изоляцией. Но для сжигания альтернативных видов топлив значения коэффициента ζ нет. Для расчетов взято $\zeta = 0,6$, как для настенных гладкотрубных и плавниковых экранов в слоевых топках для всех топлив.

Параметр M для слоевых топок в НМ

$$M = M_0 \cdot (1 + \rho) \cdot \sqrt[3]{r_v}, \quad (4)$$

где M_0 – коэффициент, для слоевых топок $M_0=0,46$; r_v – параметр забаластованности топочных газов; $\rho = R/F_{cm}$ – соотношение между поверхностью R зеркала горения (слоя) и поверхностью стен топки F_{cm} ; для данного случая (топка цилиндрическая) поверхность слоя предлагаем определять по формуле $R = d \cdot h$, где d – диаметр топки, а h – глубина топки. На рис. 4 приведено сравнение экспериментальных и расчетных данных температуры газов на выходе из топки.

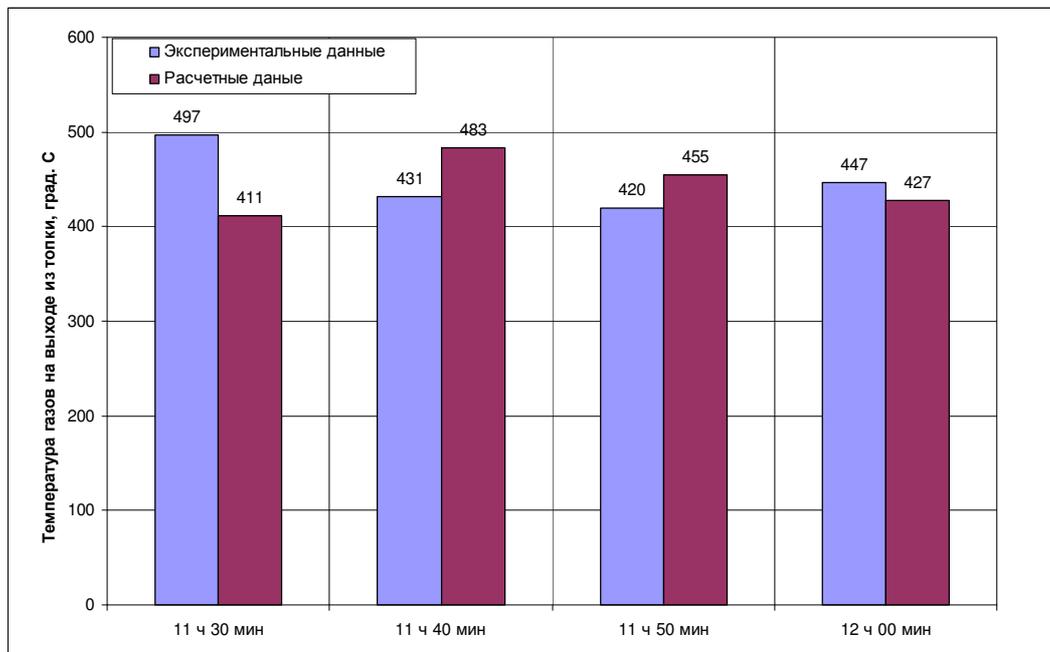


Рис. 4. Сравнение экспериментальных и расчетных значений температур дымовых газов на выходе из топки

Следует отметить, что площадь зеркала горения изменяется в течение процесса выгорания тюка соломы. Как видно из рис. 3, различия между экспериментальными и расчетными значениями составляет 11,9% ... 17,34%. Такие расхождения, по нашему мнению, связаны с ограниченным количеством исходных данных для расчета (состава топлива), а также нормативной документации для теплового расчета теплогенераторов на альтернативных видах топлива, в частности тюках соломы. На данном этапе исследований для инженерных расчетов предлагаем использовать НМ, но с адаптацией к особенностям конструкций котлов.

Выводы

Показано, что применение теплогенераторов на альтернативных видах топлива, в том числе соломе, является одной из наиболее актуальных задач. Проведены экспериментальные исследования показателей работы теплогенератора мощностью 1500 кВт для сжигания тюков соломы. Проведено сравнение расчетных и экспериментальных данных по температуре дымовых газов на выходе из топки. Различия между экспериментальными и расчетными значениями составляет 11,9% ... 17,34%. Такие расхождения связаны с ограниченным количеством исходных данных для расчета (состава топлива), а также нормативной документации для теплового расчета теплогенераторов на альтернативных видах топлива. Проанализирована возможность применения нормативного метода для расчета теплообмена в топке теплогенераторов на альтернативных видах топлива.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баштовой А. И. Использование соломы для производства тепловой энергии в отопительных котельных Донецкой области / А. И. Баштовой, Н. М. Жовмир, С. В. Радченко, С. М. Чаплыгин // Промышленная теплотехника. – 2008. – № 3. – С. 54 – 59.
2. Энергетична стратегія України до 2030 року [Електронний ресурс] / Режим доступу : http://www.niss.gov.ua/public/File/2014_nauk_an_rozrobku/Energy%20Strategy%202035.pdf.
3. Боднар Л. А. Технічні та екологічні показники водогрійних котлів потужністю до 1 МВт для спалювання соломи /Л. А. Боднар, О. В. Дахновська, Р. Е Бойчук // Науково-технічний збірник "Сучасні технології матеріали і конструкції в будівництві". – 2015. – № 2. – С. 115 – 120.
4. Гелетуца Г. Г. Особливості теплотехнічних випробувань водогрійних котлів з періодичним спалюванням цілих тюків соломи / Г. Г. Гелетуца // Промышленная теплотехника. – 2010. – № 6. – С. 45 – 50.
5. Звіт про дослідження якості соломи як твердого біопалива [Електронний ресурс] / Інститут місцевого розвитку. – 2014. – 13 с. – Режим доступу : <http://myrgorod.pl.ua/files/images/Madem/7.pdf>.
6. Corn Stover and Wheat Straw Combustion in a 176 kW boiler adapted for round bales [Електронний ресурс] / Rene Morissette, Philippe Savoie, Joey Villeneuve // Energies. – 2013. – P. 5760 – 5774. – Режим доступу : www.mdpi.com/journal/energies.
7. Development of a boiler for small straw bales combustion [Електронний ресурс] / Branislav S. Repić, Dragoljub V. Dakić, Aleksandar M. Erić, Dejan M. Đurović, Stevan D. J. Nemoda // Energy Engineering, Sustainable Energy - Recent Studies". – Режим доступу : <http://www.intechopen.com/books/sustainable-energy-recent-studies/development-of-the-technology-for-combined-heat-and-power-generation-utilizing-local-biomass>.
8. Степанов Д. В. Энергетична та екологічна ефективність водогрійних котлів малої потужності. Монографія / Д. В. Степанов, Л. А. Боднар. – Вінниця: ВНТУ, 2011. – 151 с.
9. Тепловой расчет котлоагрегатов (нормативный метод) : [под ред. Г. М. Кагана]. – Санкт-Петербург : НПО ЦКТИ, 1998. – 259 с.

Боднар Лилия Анатольевна – кандидат технических наук, доцент кафедры теплоэнергетики, Vodnar06@ukr.net.

Степанов Дмитрий Викторович – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры теплоэнергетики.

Сливко Роман Владимирович – инженер.
Винницкий национальный технический университет.